

Lungenfunktionsmessung in der Neonatologie

Kai M. Förster, Franziska Sattler*, Andreas W. Flemmer*



In diesem Artikel werden die Grundlagen der Säuglings-Lungenfunktionsmessung, Aspekte der Atemphysiologie beim Neonaten sowie deren Einfluss auf die Interpretation der Messergebnisse besprochen.

Einleitung

Als Folge einer Frühgeburtlichkeit spielt die Entwicklung einer chronischen Lungenerkrankung, d.h. der Bronchopulmonalen Dysplasie (BPD), eine zunehmend große Rolle, vor allem, da immer unreifere Frühgeborene überleben. Um objektive Parameter für die Einschätzung der Schwere einer BPD zu bestimmen, stellt die Lungenfunktionsmessung zum Zeitpunkt des errechneten Geburtstermins einen wichtigen Baustein der Diagnostik dar [1,2].

Die Charakteristika der Atemwegsanatomie und -physiologie beim Säugling haben Einfluss auf die Messmodalität der Lungenfunktion, bestimmen deren Ablauf und wirken sich schließlich auch auf die Interpretation der erhobenen Parameter in dieser speziellen Patientengruppe aus. Weitere Besonderheiten, im Gegensatz zu älteren Kindern, sind der durch eine optionale Sedierung eventuell herabgesetzte Vigilanzzustand während der Messung sowie die Notwendigkeit der Miniaturisierung der Messapparatur. Darüber hinaus sind Neonaten bevorzugte Nasenatmer und können außerdem nicht dazu aufgefordert werden, spezielle Atemmanöver durchzuführen.

Deshalb werden in dieser Altersgruppe verschiedene Verfahren angewendet, die keine Mitarbeit des Patienten erfordern und deren Kombination erst eine Beurteilung der Funktion des Organs Lunge in seiner Komplexität ermöglicht:

- Analyse der Ruheatmung:
 - In- und Expirationszeit,
 - Tidalvolumen,
 - Flowmessungen,
- Bestimmung atemmechanischer Parameter mittels Okklusionstechniken:
 - Compliance,
 - Resistance,
 - Zeitkonstante,

- Bestimmung von FRC durch Bodyplethysmografie,
- Bestimmung von Atemwegswiderständen durch Bodyplethysmografie
- Anwendung von sogenannten Kompressionstechniken:
 - RTC,
 - raised-Volume RTC,
- FRC-Messung mit Gasverdünnungstechniken.

Trotz der weiten Anwendung von Lungenfunktionstestungen mit wissenschaftlichen Fragestellungen im Neugeborenenalter – in unserer Abteilung erhalten ehemalige sehr kleine Frühgeborene im Rahmen der AIRR-Studie (Attention to Infants at Respiratory Risks) nahe dem errechneten Entbindungstermin sowie Kinder mit pulmonalen Fehlbildungen eine Lungenfunktionsmessung – werden diese Verfahren wegen ihrer begrenzten klinischen Relevanz und individuellen prognostischen Wertigkeit bisher kaum in der täglichen Routine eingesetzt.

Referenzwerte für Parameter der Lungenfunktion können vor allem aufgrund des rasanten Körperwachstums und durch die sich auch postnatal noch in ihrer Entwicklung befindliche Lunge nur schwer erstellt werden. Eine Standardisierung der unterschiedlichen Methoden wird durch den Einsatz verschiedener Lungenfunktionsmessgeräte erschwert. Richtlinien für die unterschiedlichen Messmodalitäten wurden von der European Respiratory Society (ERS) und der American Thoracic Society (ATS) publiziert [3,4].

* geteilte Letztautorenschaft

ABKÜRZUNGEN

ΔVB	Volumen der Plethysmografenkammer
AIRR-Studie	Attention to Infants at Respiratory Risks
ATS	American Thoracic Society
BPD	Bronchopulmonale Dysplasie
C	Compliance; Parameter, der die „Lungendehnbarekeit“, d. h. Volumenänderung pro Einheit Druckänderung angibt; $C = \Delta V / \Delta p$ [$\text{ml} \times \text{kPa}^{-1}$]
DZL	Deutsches Zentrum für Lungenforschung
ERS	European Respiratory Society
FEV_t	forciertes exhalierendes Volumen in Sekunden nach Beginn der Expiration
FRC	funktionelle Residualkapazität
FRC_{pleth}	plethysmografisch bestimmte funktionelle Residualkapazität
HBR	Hering-Breuer-Reflex
LCI	Lung-Clearance-Index
MBW	multiple Breath-Washout
P_{ao}	Druck zu Beginn der Atemwegsöffnung [kPa ; cmH_2O]
PMA	postmenstruelles Alter
PNT	Pneumotachograf
RAW	Atemwegswiderstand [$\text{kPa} \times \text{l}^{-1} \times \text{s}$]
REM	rapid Eye Movement
Resistance	Parameter, der den Atemwegswiderstand angibt (Quotient aus Druckänderung und dem daraus resultierenden Atemgasfluss); $R = \Delta p / \Delta V'$ [$\text{kPa} \times \text{l}^{-1} \times \text{s}$]
RTC	rapid Thoracic Compression
RV	Residualvolumen
RVRTC	raised Volume rapid thoracic Compression
SBW	single Breath-Washout
SOP	Standard Operating Procedure
SOT	Single-Occlusion Technique
sRAW	spezifischer Atemwegswiderstand
TLC	total Lung Capacity (totale Lungenkapazität)
t_{PTEF}·t_E	Verhältnis aus Zeit bis zum Erreichen des Spitzenflusses während der Expiration und Gesamtlänge der Expiration
V_{max}FRC	forcierter Atemfluss bei Erreichen der FRC [l/s]
VT	Tidalvolumen [ml]
T	Zeitkonstante des respiratorischen Systems; $T = R_{rs} \times C_{rs}$

Entwicklungsbedingte Aspekte

Insbesondere entwicklungsbedingte Veränderungen der Atemphysiologie wirken sich beim Säugling auf die Durchführung und Bewertung der Lungenfunktionsmessung aus. Dabei reagieren Dehnungsrezeptoren in den Atemwegen und in der Lunge beim Säugling während des Atemzyklus sehr empfindlich auf Druckschwankungen. So wirkt z. B. während des 1. Lebensjahres der vagal vermittelte Hering-Breuer-Reflex (HBR) bei der Inspiration einer Überdehnung der Lunge entgegen. Hinsichtlich der Lungenfunktionstestung ermöglicht er die passive Messung der mechanischen Eigenschaften der Lunge während der Ruheatmung (s. unten). Auch die Expiration wird über Dehnungsrezeptoren sensitiv beeinflusst. Sie tragen unter anderem dazu bei, dass unter Ruheatmung am Ende der Expiration ein stabiles endexpiratorisches Residualvolumen aufrechterhalten wird.

Die noch sehr elastische und weiche Thoraxwand bei Säuglingen trägt im Rahmen der Ausatmung dazu bei, dass die Lunge die Tendenz hat zu kollabieren, woraus vor allem im 1. Lebensjahr eine bedeutsame Instabilität in Bezug auf die funktionelle Residualkapazität (FRC) sowie die Gefahr des Verschlusses der kleinen Atemwege bei der Ruheatmung durch den geringen transpulmonalen Druck zum Ende der Expiration hin resultieren. Diesem Zustand wird teilweise durch die dynamische Erhöhung des endexpiratorischen Volumenlevels bei der Ruheatmung durch eine verlangsamte Ausatmung bzw. durch die Tendenz des Säuglings entgegengewirkt, den nächsten Atemzug zu beginnen, bevor das elastische Volumengleichgewicht zwischen In- und Expiration während des Atemzyklus erreicht ist. Diese Fähigkeit zur dynamischen Erhöhung des Lungenvolumens bewirkt, dass die Lunge, z. B. im Rahmen einer verlängerten Expiration, nicht kollabiert.

Während die Fähigkeit, das Atemruhevolumen derartig zu modulieren, für den Säugling vorteilhaft ist, kann es Lungenfunktionsmessungen und deren Interpretation erschweren. So mindert die damit verbundene Variabilität des endexpiratorischen Volumenlevels die Aussagekraft einer Messung und deren Interpretation. Dies gilt vor allem für volumenabhängige Parameter, wie z. B. bei der forcierten Expiration.

Apnoeepisoden stellen darüber hinaus sowohl eine Gefahr für einen instabilen Volumenstatus der Ruhevolumina zum Ende der Expiration hin dar, und sie beeinträchtigen ebenfalls die Interpretation einer Messung. Junge Säuglinge „seufzen“ deshalb regelmäßig, um eine stabile FRC zu gewährleisten. Im Rahmen der Interpretation einer Lungenfunktionsmessung fällt dieser Mechanismus wiederum immer dann auf, wenn die Inspiration plötzlich deutlich länger ausfällt als bei der

normalen Ruheatmung. Als weiteres Beispiel für einen Fallstrick bei der Analyse können „Seufzer“ bei den Gasverdünnungsmethoden auch die Atemgasverteilung beeinflussen und so die Ergebnisse verfälschen.

Schließlich haben entwicklungsbedingte Veränderungen der Atemfrequenz und der Mechanik ebenfalls signifikante Auswirkungen auf die Interpretation von longitudinalen Parametern.

Die oberen Atemwege

Säuglinge sind bevorzugte Nasenatmer, wobei der Atemwegswiderstand in diesem Bereich etwa 50% des Gesamtatemwegswiderstandes ausmacht. Gerade Infekte haben hier einen bedeutenden Einfluss auf die Lungenfunktionsmessung, und es ist ratsam, nach einem solchen mindestens 2 Wochen bis zur nächsten Lungenfunktionstestung zu warten [5]. Da die Nase darüber hinaus auch als effizienter Filter fungiert, erreichen aerosolisierte Substanzen, als Therapie oder zur Provokation verwendet, bei einem Infekt den Zielort in der Lungenperipherie vergleichsweise weniger gut als bei einem vornehmlich durch den Mund atmenden Erwachsenen.

Einfluss der Vigilanz

Merke

Die Schlaftiefe beeinflusst die Dauer des Testverfahrens.

So ist beispielsweise ein stabiles endexpiratorisches Volumenlevel für reproduzierbare Messungen der FRC und der Atemmechanik essenziell. Dies kann am besten erreicht werden, wenn sich das Kind in einer Tiefschlafphase befindet. In den REM-Schlafphasen dagegen wird das Atemmuster unregelmäßig und beeinflusst so die Messung negativ.

Cave

Die Dauer der ruhigen Schlafphasen ist umgekehrt proportional zum postmenstruellen Alter und kann nach eigener Erfahrung insbesondere bei Frühgeborenen unter 10 Minuten betragen. Dies stellt bei der Messung der Lungenfunktion von sehr jungen oder unreifen Säuglingen eine Herausforderung dar.

Unserer Erfahrung nach können Messungen unter Ruheatmung im Spontanschlaf nach Fütterung bis zu einem Alter von ca. 44 Wochen (postmenstruelles Alter) erfolgreich durchgeführt werden. Sobald aber bei der Untersuchung der Lungenmechanik ein, wenn auch sehr kurzer, Verschluss der Atemwege durch einen Shutter (Ventilmechanismus) induziert wird, ist häufig eine Sedierung notwendig. Dies gilt insbesondere für

eine Bodyplethysmografie zur FRC-Bestimmung sowie für forcierte Atemmanöver.

Mit Ausnahme eines kleinen Anteils von „Hochrisikokindern“, z. B. mit bekannter oder vermuteter Obstruktion der oberen Atemwege, hat sich Chloralhydrat (30–40 mg/kgKG nach unserem Standard) zur Schlafinduktion als sehr sicher erwiesen [6]. Die Verabreichung erfolgt am besten über eine Magensonde oder rektal, da Chloralhydrat bitter schmeckt. Der Beginn des Schlafes und seine Dauer sind interindividuell sehr unterschiedlich, sodass zur Untersuchung selten mehr Zeit als 45 Minuten bleiben. Eine Monitorüberwachung des Kindes ist während dieser Zeit unerlässlich.

Testdauer und Priorisierung der Testverfahren

Für die Lungenfunktionsmessung eines Säuglings muss eine Gesamtdauer von 3–4 Stunden veranschlagt werden. Dazu gehören

- ein ausführliches Aufklärungsgespräch mit den Eltern,
- das Einholen der Untersuchungseinwilligung sowie
- die eigentliche Vorbereitung des Säuglings inklusive der Schlafinduktion.

Wiederholungsmessungen sind wichtig für eine longitudinale Beurteilung bzw. das Monitoring eines Kindes. Die lange Untersuchungsdauer ebenso wie die Sedierungsnotwendigkeit können allerdings dazu beitragen, dass die elterliche Bereitschaft dafür nicht erneut vorhanden ist.

Angesichts einer begrenzten Schlafdauer – selbst unter Sedierung – muss eine Priorisierung der Testverfahren erfolgen (s. u.). Bestimmte Tests, wie z. B. die plethysmografische Bestimmung von Lungenvolumina, sollten vor forcierten Atemmanövern durchgeführt werden.

Ausrüstungsanforderungen

Die Lungenfunktionsmessplätze für Säuglinge sollten die von der ERS/ATS Task Force empfohlenen Anforderungen erfüllen [3, 4, 7, 8]. Angesichts des Zeitaufwandes für diese Untersuchungen und der Unmöglichkeit einer Wiederholung der Messungen bei einem Geräteausfall sollte besondere Aufmerksamkeit auf die sorgfältige Kalibrierung, die regelmäßige Wartung des Gerätes sowie eine ausreichende Ersatzteilversorgung gelegt werden.

Leckage und Totraum

Für die Lungenfunktionsmessung beim spontanatmenden Säugling ist im Allgemeinen eine transparente und weiche oronasale Maske erforderlich. Diese vergrößert aber den Totraum, was zu einer Erhöhung des Tidalvolumens (VT) und einer möglichen Erhöhung des endexpiratorischen Volumenlevels der Lunge führt. Luftaustritt um die Gesichtsmaske herum ist zusätzlich eine häufige Fehlerquelle, kann aber schwer zu identifizieren sein und führt dazu, dass eine Messung nicht verwendet werden kann. Hinweise für ein Leck sind niedrige Tidalvolumina, die Drift des Volumensignals unter Ruheatemanalyse oder das Nicht-Zurückkehren eines stabilen endexpiratorischen Volumenstatus zum Ausgangsvolumen nach einem kurzen Atemwegsverschluss.

Auswahl des Testverfahrens

In der Regel ist es besser, zunächst eine qualitativ hochwertige, leckagefreie Messung der Ruheatmung und der passiven Lungenmechanik durchzuführen, bevor man zu komplexeren Bewertungen wie der plethysmografischen Bestimmung der FRC oder von forcierten Expirationsmanövern übergeht. Die Reihenfolge der Tests sollte durch die Untersuchungsindikation aufgrund der zugrundeliegenden Pathophysiologie bestimmt werden. Tests mit forcierten Expirationsmanövern sollten idealerweise nach denen der passiven Mechanik oder der Ruheatmung durchgeführt werden, da die Anwendung einer thorakoabdominalen Druckerhöhung wie bei der rapid Thoracic Compression (RTC) die Atemmechanik und die FRC beeinträchtigen kann.



► **Abb. 1** Messplatz für die Säuglingslungenfunktion mit Steuerpanel und Plethysmografenkammer.

Allgemeine Messbedingungen

Die Kinder werden im Spontanschlaf in Rückenlage untersucht, meistens ist aber eine milde Sedierung, z. B. mit Chloralhydrat, erforderlich. Dabei erfordert es Erfahrung, bei der Sedierung eine ausreichende Schlaf-tiefe zu erreichen, die es ermöglicht, dass der Säugling die Atemmaske toleriert, die luftdicht aufgesetzt werden muss. Andererseits dürfen durch die Medikation aber das Atemmuster und die -tiefe nicht derart beeinflusst werden, dass dies Auswirkungen auf die Messung hat.

Laut unserer DZL (Deutsches Zentrum für Lungenforschung)-internen SOP *Neo_Lung Function Testing* muss der Säugling während der Messung mittels eines Herz-Atem-Monitors überwacht werden, und es ist eine Notfallausrüstung vorzuhalten.

PRAXIS

Tipp

Weiche Physiotherapieknetmasse, an den Rand der Atemmaske aufgebracht, kann eine Abdichtung zwischen Gesicht und Maske erleichtern und den Totraum minimieren. Alternativ dazu kann auch eine luftgefüllte, gepolsterte Maske verwendet werden.

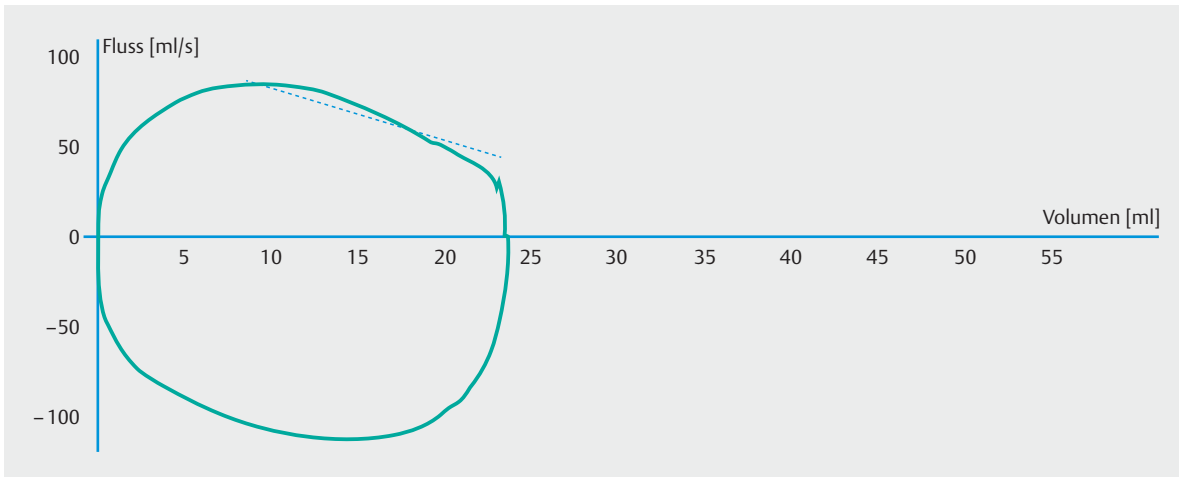
Die Maske liegt über Mund und Nase des Kindes, und über einen Pneumotachografen werden kontinuierlich der Atemgasfluss und damit die Atemfrequenz und das Tidalvolumen gemessen (► **Abb. 1**).

Ruheatemanalyse

Merke

Die exakte Untersuchung der Ruheatmung mittels Fluss-Volumen-Kurven bildet die fundamentale Grundlage der Säuglingslungenfunktion.

Obwohl die Ruheatemanalyse oberflächlich betrachtet eine der einfachsten Untersuchungen zu sein scheint, sind die Messungen und deren Interpretation in der Tat sehr komplex. Durch die Messung des Atemgasflusses mit dem Pneumotachografen (PNT) oder einem Ultraschallsensor können die Volumina als Zeitintegrale berechnet werden. Dadurch lassen sich das Tidalvolumen, die Atemfrequenz sowie die In- und die Expirationszeit bestimmen (s. ► **Abb. 2**).



► **Abb. 2** Tidalvolumen und -fluss während der Ruheatmung. Zusätzlich werden folgende Parameter aus Aufzeichnungen der Ruheatmung berechnet: Atemfrequenz, Expirationsvolumen in Ruheatmung, Inspirationsvolumen und -fluss in Ruheatmung, Inspirations- und Expirationszeit, Gesamtzeit des Atemzuges und Verhältnis der Zeit bis zum Erreichen des Spitzenflusses in der Expiration zur gesamten Expirationszeit.

Vorsicht

Aufgrund der ausgeprägten Variabilität der Fluss-Volumen-Kurven, insbesondere im frühen Kindesalter, sollte die Interpretation nur zusammen mit der Klinik und optional weiteren Lungenfunktionstests erfolgen.

Versuche, die beschriebenen Muster (► **Abb. 3**) zu evaluieren, haben unter anderem zur Beschreibung des Parameters $t_{PTFE}:t_E$, dem Verhältnis der Zeit bis zum Erreichen des Spitzenflusses in der Expiration zur gesamten Expirationszeit geführt. Dieser Index kann im Rahmen einer Atemwegsobstruktion verringert sein

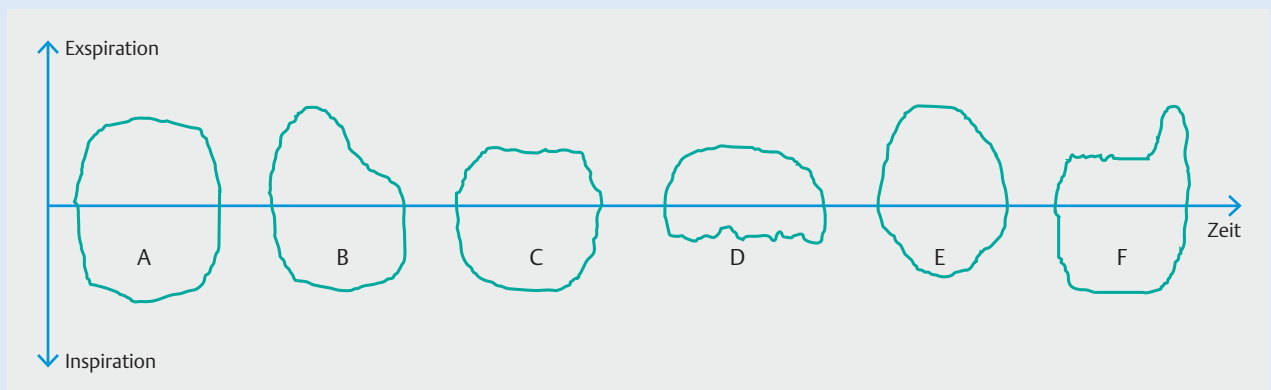
PRAXIS

Fluss-Volumen-Kurven

Fluss-Volumen-Kurven (► **Abb. 3**) können bei der Ruheatemanalyse wichtige Informationen über die Lokalisation einer Obstruktion innerhalb der Atemwege liefern:

- Die Verengung der peripheren Atemwege erzeugt im Allgemeinen ein konkaves Muster des expiratorischen Teils der Fluss-Volumen-Kurve, der Spitzenflow tritt dabei früh in der Expiration auf (► **Abb. 3, B**).

- Intrathorakale Obstruktion (► **Abb. 3, C**).
- Eine Abflachung des Inspirationsteils deutet auf eine extrathorakale Atemwegsobstruktion hin (► **Abb. 3, D**).
- „Steife“ Lunge mit einer niedrigen Compliance (► **Abb. 3, E**).
- Expiratorisches Stöhnen zur Verlängerung der Zeitkonstante (z. B. bei niedriger FRC) (► **Abb. 3, F**).



► **Abb. 3** Fluss-Volumen-Kurven unter Ruheatmung: A = normale Form; B = periphere Atemwegsobstruktion; C = zentrale intrathorakale Obstruktion; D = extrathorakale Obstruktion; E = verminderte Compliance; F = expiratorisches „Knorksen“ bei vermindelter funktioneller Residualkapazität.

und hat sich in epidemiologischen Studien als wertvoller Parameter für eine frühe Determinante der Lungen- bzw. Atemwegsfunktion erwiesen [9].

$t_{\text{PTEF}}:t_{\text{E}}$ vermittelt jedoch, wie die meisten Ruheatemparameter, vor allem gemischte Informationen über das Zusammenspiel zwischen zentraler Atemkontrolle und Atemwegsmechanik, was eine zurückhaltende Interpretation erfordert. So konnte er nicht zwischen Säuglingen mit Mukoviszidose oder solchen, die sich von einer BPD erholen, diskriminieren [10].

Atemmechanik

Während der Neonatal- und Säuglingszeit sind die meisten Atemwegserkrankungen durch eine Atemwegsobstruktion gekennzeichnet. Eine Verringerung des Atemwegskalibers kann verschiedene Ursachen haben: Sekretobstruktion, Entzündungen, eine Verdickung der Atemwegswand, ein erhöhter Tonus glatter Muskelzellen innerhalb der Bronchien, eine verminderte Lungen- oder Brustwandelastizität oder eine Störung der alveolären Struktur. Insbesondere forcierte Expirationsmanöver können die beschriebenen Veränderungen mit einem erhöhten Widerstand oder reduzierten Atemgasflüssen und -volumina demaskieren.

Merke

Die Messung der Atemmechanik kann Informationen über die Compliance der Lungen und/oder der Brustwand sowie über die Resistance der Atemwege und damit über den Durchmesser bzw. eine Obstruktion der Atemwege geben. Diese beiden Parameter bestimmen die zu leistende Atemarbeit, die erforderlich ist, um die Lunge zu belüften.

Dabei wird die Compliance (C_{rs}) als die Änderung von Volumeneinheit (ΔV) pro Änderung der Druckeinheit (Δp) berechnet:

$$C_{rs} = \Delta V / \Delta p$$

und gibt die „Steifheit“ der Lunge wieder.

Die Resistance (R), d. h. der Atemwegswiderstand, wird als Quotient aus der Druckänderung (Δp) und dem daraus resultierenden Atemgasfluss ($\Delta V'$) berechnet:

$$R = \Delta p / \Delta V'$$

Für die Beurteilung der Atemmechanik müssen deswegen Änderungen von Druck und Atemgasfluss aufgezeichnet werden, wobei man das Volumen durch Integration des Flusses ($V = \text{Fluss} \times \text{Zeit}$) erhält. Während der Atemgasfluss und das Volumen in der Regel mit einem Strömungssensor, dem PNT, oder einem Ultraschallsensor an der Atemwegsöffnung gemessen wer-

den, können Änderungen des Druckes auf verschiedene Weise abgeleitet werden.

Bei der Okklusionstechnik wird die Summe der Druckänderungen über der Brustwand, der Lunge und den Atemwegen gemessen, sodass der Widerstand und die Compliance des gesamten Atemapparates erfasst werden können.

Soll dagegen beispielsweise der Widerstand der Atemwege isoliert betrachtet werden, ist eine Messung der Druckänderungen zwischen den Alveolen und der Atemwegsöffnung mittels Plethysmografie erforderlich (s. u.).

Da die Compliance der Lunge mit zunehmendem Wachstum zunimmt (die Thoraxcompliance nimmt jedoch ab), während der Atemwegswiderstand abnimmt, müssen die Ergebnisse einer lungenmechanischen Messung an die Lungengröße angepasst werden, indem sie als spezifische Compliance ($sC = C / \text{FRC}$) oder spezifische Resistance ($sR = R \times \text{FRC}$) auf die jeweilige FRC normiert werden.

Messungen der passiven Atemmechanik (Compliance, Widerstand und Zeitkonstante, τ_{rs}) sind möglich, wenn ein Zustand der Relaxation in den Atemwegen herbeigeführt werden kann. Bei Neugeborenen und Säuglingen unterliegt die Resistance des gesamten respiratorischen Systems (R_{rs}) im Rahmen von Atemwegserkrankungen signifikanten Schwankungen.

Merke

Das Hauptaugenmerk von Messungen der Lungenmechanik liegt deshalb auf der Beurteilung der Compliance.

Die Okklusionstechnik zur Messung der passiven Atemmechanik basiert auf der Fähigkeit, während der Ruheatmung den Hering-Breuer-Reflex durch einen kurzen endinspiratorischen Atemwegsverschluss mittels eines Ventilmechanismus (sog. Shutter) auszulösen. Die Aktivierung von vagal vermittelten pulmonalen Stretch-Rezeptoren durch einen Atemwegsverschluss oberhalb des Niveaus der funktionellen Residualkapazität führt zu einer Hemmung der weiteren Inspiration und einer Relaxierung der Atemmuskulatur.

Sofern keine Atemmuskulaturaktivität vorhanden ist und nach dem Atemwegsverschluss eine ausreichende Zeit für einen Druckausgleich über die Atemwege sowie die Möglichkeit zur passiven Ausatmung nach der Wiederöffnung gewährleistet ist, repräsentiert der an der Atemwegsöffnung gemessene Druck am Ende der Okklusion den Alveolardruck. Ein stabiles und ausreichend langes Druckplateau (s. ► **Abb. 4**) stellt gleichzeitig ein Qualitätskriterium für die Messung dar, da es die Dich-

tigkeit der Atemmaske und damit des Systems sowie die Relaxierung der Atemmuskulatur anzeigt.

Durch die Zuordnung dieses Druckes zu dem anschließend exhaliierten Volumen bzw. zu dem nach dem Lösen des Verschlusses auftretenden Atemgasstrom können Compliance und Resistance des respiratorischen Systems bestimmt werden.

Single-Breath oder Single-Occlusion Technique (SOT)

Bei der Single-Breath- oder Single-Occlusion Technique (SOT) können die Resistance, die Compliance und die passive Zeitkonstante der Atemwege (τ_{rs}) aus einem einmaligen endinspiratorischen Atemwegsverschluss berechnet werden. Die Zeitkonstante τ_{rs} (=Volumen/Fluss) kann aus der Fluss-Volumen-Beziehung während einer passiven Ausatmung abgeleitet werden. Dabei werden auch die Parameter abgeleitet, die für die Compliance und Resistancebestimmung notwendig sind.

Da Säuglinge häufig dynamisch ihre FRC erhöhen, indem sie nach der Okklusion etwas früher als üblich einatmen, ist es notwendig, den linearen Teil der Fluss-Volumen-Kurve auf den Nullfluss zu extrapolieren, um die entsprechende Volumenänderung bei der Berechnung der C_{rs} zu schätzen. Da $\tau = R_{rs} \times C_{rs}$ ist, kann der Atemwiderstand (R_{rs}) als τ/C_{rs} abgeleitet werden, und die Compliance des gesamten Atmungssystems (C_{rs}) lässt sich berechnen, indem das extrapolierte Volumen auf den während der Okklusion gemessenen Atemwegs- bzw. Alveolardruck bei Auslösen des Hering-Breuer-Reflexes (HBR) bezogen wird.

Bei Säuglingen mit einer schweren Obstruktion der Atemwege oder einer hohen Atemfrequenz ist es schwierig, ausreichend schnell einen Druckausgleich in den Atemwegen zu erreichen. Infolge einer zusätzlichen inhomogenen Belüftungssituation kann bei diesen Kindern die Lungenmechanik nicht mittels einer einzelnen Zeitkonstante τ_{rs} beschrieben werden. Die Ergebnisse aus der SOT spiegeln die kombinierte Mechanik der gesamten Atemwege (Brustwand, Lunge und Atemwege) wider, was wiederum die Möglichkeit, subtile Veränderungen der Lungenfunktion zu erkennen, mindert.

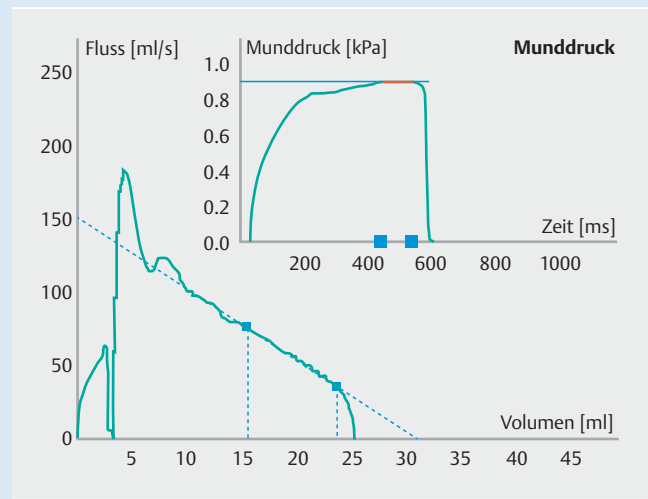
Multiple-Breath Occlusion Technique (MBOT)

Mit der Multiple-Breath Occlusion Technique (MBOT) wird der Atemgasstrom repetitiv, bezogen auf verschiedene Volumina, oberhalb des endexpiratorischen Volumenlevels unterbrochen. Zwischen den einzelnen Atemwegsverschlüssen sollte wieder eine stabile Atemmittellage erreicht werden. Die gemessenen Werte werden ebenfalls in einer Druck-Volumen-Kurve

PRAXIS

Beurteilung der passiven Atemmechanik durch die Single-Breath-Okklusionstechnik

Durch die Single-Breath-Okklusionstechnik kann mittels endinspiratorischem Atemwegsverschluss und Auslösung des Hering-Breuer-Reflexes die passive Atemmechanik beurteilt werden: Das Gasvolumen in der Lunge oberhalb des passiv bestimmten Volumenniveaus nach Expiration unter Ruheatmung wird berechnet, indem der lineare Teil der absteigenden Fluss-Volumen-Kurve auf den Nullstrom bzw. bis zur passiven FRC extrapoliert wird. Zum Zeitpunkt ohne Atemgasstrom (d. h. bei Atemwegsverschluss) und bei vollständiger Entspannung der Atemmuskulatur, wie sie durch das Erreichen eines Druckplateaus angezeigt wird, können der *Druckausgleich* und der *elastische Rückstoßdruck* der Atemwege an der Atemwegsöffnung gemessen werden. Die *Compliance* des respiratorischen Systems kann dann als $\Delta V/\Delta P$ berechnet werden. Der Quotient von ΔP mit ΔF ergibt die *Resistance* (► **Abb. 4**).



► **Abb. 4** Beurteilung der passiven Atemmechanik durch die Single-Breath-Okklusionstechnik.

PRAXIS

Gültige Messungen der Atemmechanik hängen also von den folgenden drei grundlegenden Annahmen ab:

- Es kommt zu einer vollständigen Entspannung der Atemwege sowohl während des Verschlusses als auch während des anschließenden Ausatmens.
- Der Druck an der Atemwegsöffnung/Gesichtsmaske gleicht sich schnell aus und stellt somit den Alveolardruck dar.
- Sowohl die Compliance als auch die Resistance bleiben während der gesamten Expirationsphase konstant, sodass die Lunge angenähert als ein Ein-Kammer-Modell mit einem einzelnen Wert für die Zeitkonstante τ_{rs} betrachtet werden kann.

dargestellt, aus deren Steigung die Compliance berechnet werden kann.

Merke

Aufgrund der aktuellen Studienlage lässt sich noch nicht abschließend sagen, welche Methode die validen Werte liefert. Unserer Erfahrung nach irritiert der wiederholte Verschluss bei der MBOT-Messung den Säugling eher und macht die Methode so anfälliger für Artefakte.

Inspiratory Capacity at Inflation Hold

Inzwischen gibt es auch in verschiedenen Beatmungsgeräten bereits implementierte Lungenfunktionsmessprogramme, die über die Methode „Inspiratory Capacity at Inflation Hold“ eine unkomplizierte Messung im klinischen Alltag erlauben. Allerdings erfordert auch diese automatisierte Messung einen erfahrenen Blick auf die klinische Situation des Kindes und die davon abhängigen Beatmungsparameter, da diese z. B. durch einen mit Wasser benetzten Pneumotachografen verändert sein können und so das Resultat verfälschen.

Bodyplethysmografie

Die Bodyplethysmografie erfasst spirometrisch nicht messbare Lungenvolumina und erlaubt die Bestimmung von Atemwegwiderständen. Messungen des Lungenvolumens sind für eine genaue Interpretation der Atemmechanik unerlässlich und können ein wert-

volles Mittel zur Bestimmung des normalen Lungenvolumens sein [11,12]. Dabei ist der wichtigste Parameter das am Ende einer Expiration in Ruheatmung verbleibende Lungenvolumen, d. h. die funktionelle Residualkapazität (FRC). Die Beurteilung der plethysmografisch bestimmten FRC (FRC_{pleth}) bei Säuglingen ist in der klinischen und epidemiologischen Forschung weit verbreitet [13]. Obwohl versucht wurde, weitere Parameter wie das Residualvolumen (RV) oder die gesamte Lungenskapazität (TLC) durch die Kombination der Bodyplethysmografie mit der raised Volume Technique zu bestimmen, ist diese Methode bisher nicht in die klinische Routine übernommen worden (► **Abb. 5**).

Eine reduzierte FRC kann als Folge einer interstitiellen Lungenerkrankung [14] oder einer Lungenhypoplasie auftreten. Andererseits können sowohl eine Hyperinflation (aufgrund der dynamischen Erhöhung des Lungenvolumens in Gegenwart eines erhöhten Atemwegwiderstands und einer verlängerten τ_{rs}) als auch Gastrapping (z. B. aufgrund eines peripheren Atemwegsverschlusses) durch FRC-Messungen bei Säuglingen mit Wheezing oder einer zystischen Fibrose angezeigt werden [15].

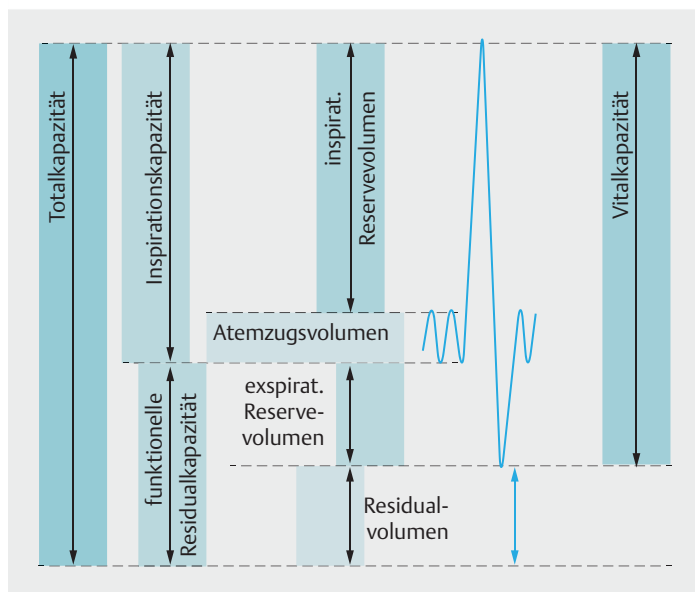
Die plethysmografische Beurteilung der FRC basiert auf dem Gesetz von Boyle-Mariotte. Danach bleibt für eine vorgegebene Gasmasse bei einer bestimmten Temperatur das Produkt aus Druck und Volumen konstant:

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2$$

1 und 2 beziehen sich auf die Anfangs- und Endbedingungen des Gases.

Die Beurteilung von FRC_{pleth} erfolgt, während das schlafende Kind im geschlossenen Plethysmografen liegt (einer relativ luftdichten Kammer, die durch kleinste Druckänderungen Veränderungen des Lungenvolumens des Säuglings erfassen kann).

Das Prinzip der Bodyplethysmografie bei Säuglingen zeigt ► **Abb. 6**). Der Plethysmograf wird vor der Messung auf das Volumen hin geeicht, sodass Veränderungen des Lungenvolumens während des Atemzyklus durch Atemanstrengungen gegen einen geschlossenen Ventilmechanismus aufgezeichnet werden können. Das Kind atmet durch eine Maske, die mit einem PNT verbunden ist, der wiederum den Atemgasfluss (und damit das Tidalvolumen) in die und aus der Lunge aufzeichnet. Der PNT enthält einen Druckaufnehmer, der Druckänderungen zum Zeitpunkt der Atemwegsöffnung (p_{a0}) detektiert, und ist mit einem Ballonshutter verbunden, der vorübergehend jeglichen Luftstrom verhindern kann. In der Abwesenheit eines Luftstroms gleichen sich die Drücke in den Atemwegen so aus,



► **Abb. 5** Lungenvolumina – Bodyplethysmografie. Schematische Darstellung der Gasvolumina bei Ruheatmung sowie bei maximaler In- und Expiration (Quelle: Intrathorakales Gasvolumen. In: Hentschel R, Jorch G, Hrsg. Fetoneonatale Lunge, 1. Auflage. Stuttgart: Thieme; 2016. doi:10.1055/b-003-129349).

dass der Alveolardruck direkt an der Atemwegsöffnung gemessen werden kann.

Nach Etablierung eines stabilen endexpiratorischen Volumenlevels wird der Atemweg durch den Shutter verschlossen und grenzt so eine definierte Gasmasse in der Lunge ein. Deren Volumen kann nach dem Boyle-Gesetz berechnet werden. Während dieser Zeit unternimmt das Kind weiterhin Atemanstrengungen gegen den Verschluss. Dies führt zur zyklischen Expansion und Kompression des Gasvolumens in der Kammer. Da der Anfangsdruck (p_1) in der Lunge zum Zeitpunkt der Okklusion als ungefährer atmosphärischer Druck bekannt ist und sowohl die Veränderungen des Lungenvolumens als auch die Veränderung des Alveolardruckes an der Atemwegsöffnung (Δp_{ao}) gemessen werden können (aus Veränderungen des Boxvolumens $[\Delta VB]$ und Druckänderungen), kann das Anfangsvolumen (V_1) berechnet werden. Nach Korrektur um den Totraum der Apparatur entspricht V_1 der FRC_{pleth} :

$$FRC_{pleth} = (\Delta VB / \Delta p_{ao}) \times \text{Luftdruck}$$

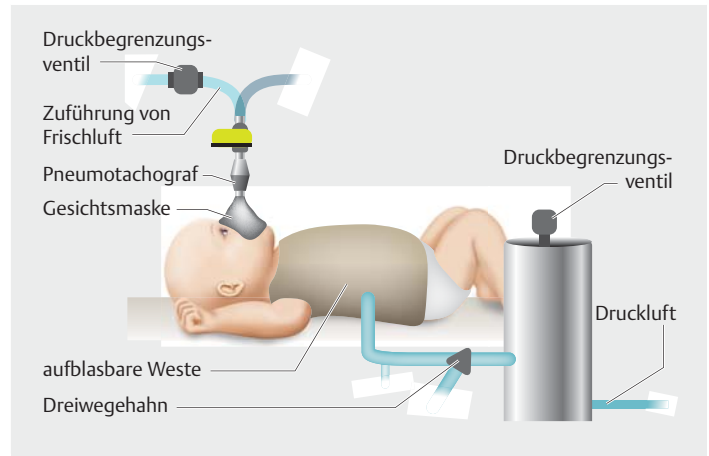
Plethysmografische Messung des Atemwegwiderstandes (sRaw)

Dieser Wert wird ebenfalls in Ruheatmung gemessen und gibt damit den Widerstand wieder, den der Gasfluss bei Spontanatmung überwinden muss. Da dieser Parameter durch die großen Atemwege entsteht, können zentrale Obstruktionen untersucht werden.

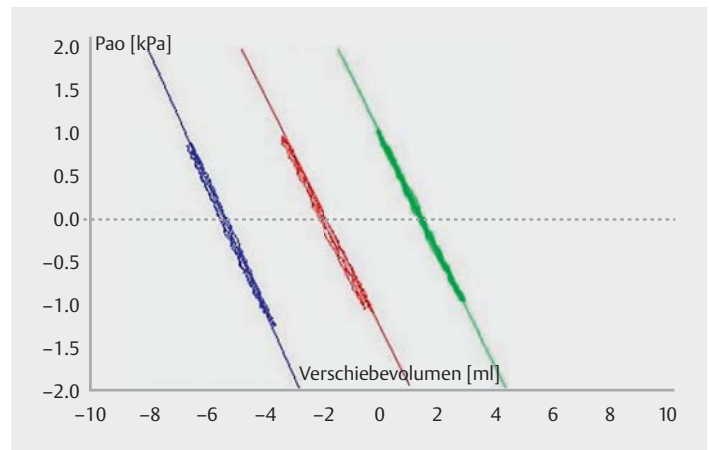
Am Mundstück wird dazu wieder kontinuierlich der Atemgasfluss gemessen. Gleichzeitig wird das durch die Thoraxbewegungen erzeugte Verschiebevolumen innerhalb der Plethysmografenkammer gemessen. Der Quotient aus Druckschwankung bzw. Verschiebevolumen und Atemstrom ergibt den spezifischen Atemwegwiderstand (► **Abb. 7**).

Die sogenannten Widerstandsschleifen erhält man, wenn man den Atemstrom gegen das Verschiebevolumen aufträgt. Ihre Form liefert, ähnlich wie die Fluss-Volumen-Kurven unter Ruheatmung, wichtige Informationen über die Lokalisation einer Atemwegsobstruktion. Beim lungengesunden Säugling verläuft die Atemwegsschleife fast linear und steil, d. h. ein geringes Verschiebevolumen bzw. eine kleine Druckschwankung erzeugt einen hohen Atemgasstrom. Wird der Atemwegwiderstand größer, verläuft die Schleife flacher. Bei einer inhomogenen Atemwegsobstruktion öffnet sich die Schleife zudem, da Druckveränderungen und die konsekutive Atemstromveränderung zeitversetzt ablaufen.

Der *spezifische Atemwegwiderstand* ($sRaw$) entspricht der Steigung der Atemschleife. Er ist ein Maß für die aufzuwendende Atemarbeit und wenig abhängig von



► **Abb. 6** Baby-Bodyplethysmografie einschließlich der rapid Thoracic Compression (RTC)-Technik: Messungen der plethysmografischen funktionellen Residualkapazität (FRC_{pleth}) werden durchgeführt, während das Kind im Plethysmografen schläft und gegen einen geschlossenen Ventilmechanismus (Shutter) atmet (Quelle: Durchführung bei Säuglingen und Kleinkindern. In: Hentschel R, Jorch G, Hrsg. Fetoneonatale Lunge, 1. Auflage. Stuttgart: Thieme; 2016. doi:10.1055/b-003-129349)



► **Abb. 7** Beziehung zwischen dem Druck im Mund des Kindes bei Atemwegsöffnung und dem durch die Atemanstrengung generierten Verschiebevolumen im Plethysmografen.

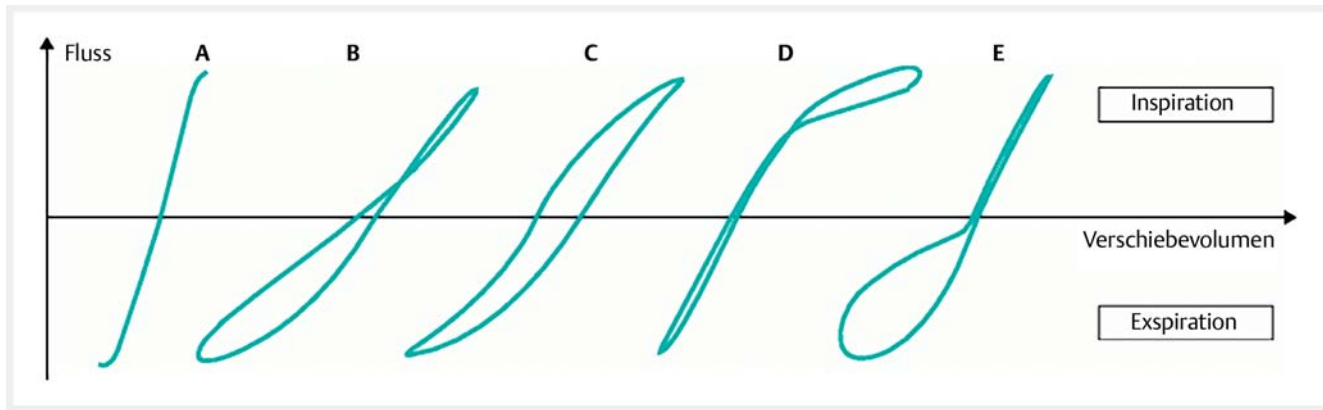
der Größe der Lunge. Eine kleine Lunge erfordert kleinere Verschiebevolumen, hat aber engere Atemwege mit höheren Widerständen (► **Abb. 8**).

Bezieht man den $sRaw$ auf das Lungenvolumen, erhält man den *totalen Atemwegwiderstand* (RAW):

$$RAW = \frac{sRAW}{FRC_{pleth}}$$

Rapid Thoracic Compression

Um eine Aussage über eine mögliche Obstruktion der kleinen Atemwege treffen zu können, bedarf es einer forcierten Expiration. Das Problem der mangelnden Kooperation in der Patientengruppe der Neonaten



► **Abb. 8** Atemschleifen bei der Bodyplethysmografie: A = Normalbefund: steile, fast lineare Kurve. B = Intrathorakale Obstruktion mit überwiegend expiratorischer Widerstandserhöhung. C = In- und expiratorische Widerstandserhöhung. D = Extrathorakale Obstruktion mit inspiratorischer Widerstandserhöhung. E = Emphysem mit expiratorischer Widerstandserhöhung (Quelle: Freihorst J. Lungenfunktionsdiagnostik bei Kindern – Methoden und Interpretation. Pädiatrie up2date 2015; 10 (01):87–99. doi:10.1055/s-0034-13914).

wurde zunächst mittels der Rapid Thoracic Compression (RTC)-Methode überwunden. Dabei trägt der Säugling eine Weste, die durch ein schnelles Aufpumpmanöver am Beginn der Expiration mit Luft gefüllt wird und dadurch den Thorax des Säuglings komprimiert. Bei der so induzierten passiven partiellen forcierten Expiration lassen sich die Spitzenflüsse während der Ausatmung messen.

Die dabei generierten Fluss-Volumen-Kurven besitzen Ähnlichkeiten mit den forcierten Kurven bei älteren Kindern. Obstruktive Atemwegserkrankungen sind auch hier durch eine konkave Form der Fluss-Volumen-Kurve charakterisiert.

Die V'_{\max} FRC beschreibt den forcierten Atemfluss in l/s beim Erreichen der FRC. Eine Weiterentwicklung der RTC stellt die raised Volume rapid thoracic Compression (RVRTC) dar. Dabei wird die maximale Inspiration vor der forcierten Expiration herbeigeführt, indem mit der Weste am Ende einer Inspiration eine Kompression durchgeführt wird, bevor das eigentliche Squeeze-Manöver stattfindet. Dadurch wird eine konventionelle forcierte Expiration, die von der totalen Lungkapazität ausgeht, nahezu imitiert und die Reproduzierbarkeit der Messungen noch einmal erhöht.

Außerhalb von Studien wird die Säuglingsbodyplethysmografie praktisch kaum eingesetzt. Es gibt jedoch einige klinische Fragestellungen, bei denen eine Lungenfunktionsmessung beim Säugling eine zusätzliche Komponente in der Diagnostik darstellen kann. Dies gilt beispielsweise für:

- angeborene Lungenfehlbildungen,
- Z. n. Lungenteilresektion,
- Lungenhypoplasie,
- Zwerchfellparese oder Zwerchfellrelaxation.

So wurde bei Z. n. ausgeprägter Omphalozele im Alter von 19 Monaten eine Restriktion des Lungenvolumens nachgewiesen. Zudem traten häufiger eine Hyperreagibilität und eine positive Bronchospasmyse auf [16]. Bei Kindern mit Herzvitien mit Links-rechts-Shunt konnte außerdem gezeigt werden, dass durch die Lungenüberflutung eine eingeschränkte Lungenfunktion induziert wird [17].

Auswaschverfahren

Die FRC kann auch mithilfe der Gasverdünnungstechnik bestimmt werden. Bei den sogenannten Auswaschverfahren wird der Atemluft ein inertes Gas in einem geschlossenen System zugesetzt. Beim dem weit verbreiteten Stickstoff-Auswaschverfahren wird Sauerstoff zum Verdrängen des Stickstoffs aus der Lunge verwendet, wobei bei Säuglingen Apnoen induziert werden können. Außerdem ist die Messung an der natürlichen Ausgangskonzentration von Stickstoff in der Atemluft ausgerichtet, weswegen sie bei Patienten mit Supplementärsauerstoff, wie z. B. bei BPD (=Bronchopulmonale Dysplasie), nicht angewendet werden kann.

Merke

Bei Neonaten und Säuglingen sind daher alternative inerte Gase, wie z. B. Schwefelhexafluorid anzuwenden.

Nachdem ein Konzentrationsgleichgewicht erreicht ist, kann aus der Anfangs- und der Endkonzentration die FRC_{Gas} berechnet werden. Alle ventilerten Bezirke, aber auch nur diese, werden mit diesem Verfahren gleichmäßig abgebildet, sodass Ventilationsinhomogenitäten und insbesondere Veränderungen an den kleinen Atemwegen sehr sensitiv erfasst werden. Allerdings werden Regionen mit einer Überblähung nicht abgebildet, da bei der Gasverdünnung nur das an der

Luftbewegung teilnehmende Gasvolumen einen Einfluss besitzt.

Bei den Auswaschverfahren unterscheidet man die *Multiple-Breath-Washout-Methode (MBW)*, bei der Tidalvolumina mehrerer Atemzüge in Ruhe untersucht werden, von der sogenannten *Single-Breath-Washout-Methode (SBW)*, wobei die gesamte Vitalkapazität eines einzelnen Atemzuges analysiert wird. Erstere ist für die Lungenfunktionsmessung in der Neonatologie geeignet, da sie in Ruheatmung durchgeführt werden kann, während die SBW eine gute Kooperation erfordert.

Multiple-Breath Washout (MBW)

Mit Hilfe der MBW können Informationen über die Homogenität der pulmonalen Luftverteilung gewonnen werden. Sogenannte Ventilationsinhomogenitäten spiegeln Veränderungen an den peripheren Atemwegen wider, die mit der Spirometrie nicht detektierbar sind. Dabei wird ein inertes Indikatorgas bis zum Erreichen eines Konzentrationsgleichgewichtes eingeatmet (sog. „wash in“). Anschließend wird die abnehmende Konzentration in der Ausatemluft gemessen (sog. „wash out“). In der gesunden Lunge erfolgt der Konzentrationsabfall rasch, in einer inhomogen belüfteten Lunge verzögert.

Der Konzentrationsabfall wird quantitativ durch den *Lung-Clearance-Index (LCI)* beschrieben, der Quotient aus der Menge des ausgeatmeten Gases und der FRC.

PRAXIS

Tipp

Der LCI ist derzeit dabei der robusteste Parameter zur Quantifizierung von Ventilationsinhomogenitäten und eignet sich wegen der Konstanz über alle Altersstufen gut für Verlaufskontrollen [18].

Bei der Bestimmung der *Moment Ratio* wird der zeitliche Verlauf der Auswaschung genauer analysiert. Es müssen aber weitere Studien abgewartet werden, um eine Beurteilung dahingehend vornehmen zu können, welcher der beiden Werte letztlich die klinisch relevanten Informationen liefert.

Zusammenfassung

Die Ruheatemanalyse bildet die Grundlage der Säuglingslungenfunktionsuntersuchung. Die Okklusionstechnik zur Bestimmung der Compliance und der Resistance ist ein schon lang etabliertes Verfahren, das vom Anwender Kenntnisse in der Atemmechanik erfordert. Für den Einsatz in der Neonatologie ist es interes-

sant, da es auch bettseitig auf der Intensivstation eingesetzt werden kann.

Die Bodyplethysmografie klassifiziert restriktive Ventilationsstörungen und erkennt Überblähungszustände, die besonders bei der BPD eine Rolle spielen.

Die Parameter der Ruheatemanalyse und der Lungenmechanik (Compliance und Resistance) wurden bei Säuglingen bisher vor allem im Rahmen von Studien mit verschiedenen Geräten und bei unterschiedlichen Grunderkrankungen ermittelt, weswegen belastbare Referenzwerte fehlen. Selbst in Kenntnis der Klinik ist es schwer zu entscheiden, ab wann ein bestimmter Messwert einen Krankheitswert besitzt, sodass Messungen im klinischen Alltag selten in Therapieentscheidungen mit einbezogen werden.

Bei den Auswaschverfahren scheint der Lung-Clearance-Index (LCI) vor allem bei der klinischen Betreuung von Säuglingen und Kleinkindern mit Mukoviszidose von Bedeutung zu sein. Hierbei kommt es vor allem zu Ventilationsstörungen der kleinen Atemwege, die mit diesem Parameter sensitiv bestimmt werden, sodass dann direkt Therapieentscheidungen abgeleitet werden können.

Diese Methode besitzt auch bei anderen Erkrankungen mit einer inhomogenen Belüftungssituation und Anteilen einer Ventilationsstörung ein großes Potenzial, das aber noch weiter evaluiert werden muss.

KERNAUSSAGEN

- Lungenfunktionsmessungen im Neonatenalter werden nicht regelmäßig in der klinischen Routine eingesetzt.
- Während der Lungenfunktionsmessung muss der Säugling mittels eines Herz-Atem-Monitors überwacht werden.
- Aufgrund der ausgeprägten Variabilität der Fluss-Volumen-Kurven bei der Ruheatemanalyse im frühen Kindesalter sollte die Interpretation nur zusammen mit der Klinik erfolgen.
- Messungen der passiven Atemmechanik (Compliance, Widerstand und Zeitkonstante) sind möglich, wenn ein Zustand der Relaxation in den Atemwegen herbeigeführt werden kann.
- Bei der Single-Okklusion-Technik wird die Lunge als ein Ein-Kammer-Modell mit einem einzelnen Wert für die Zeitkonstante behandelt.
- Der wichtigste Parameter der Bodyplethysmografie in der Säuglingszeit ist die funktionelle Residualkapazität (FRC). Die plethysmografische Beurteilung der FRC basiert auf dem Gesetz von Boyle-Mariotte.

- Ventilationsinhomogenitäten und insbesondere Veränderungen an den kleinen Atemwegen können mit den Auswaschverfahren sensitiv erfasst werden.

Schlüsselwörter

Fluss-Volumen-Kurve, Hering-Breuer-Reflex, Compliance, Resistance, Funktionelle Residualkapazität

Interessenkonflikt

Erklärung zu finanziellen Interessen

Forschungsförderung erhalten: nein; Honorar/geldwerten Vorteil für Referententätigkeit erhalten: nein; Bezahlter Berater/interner Schulungsreferent/Gehaltsempfänger: nein; Patent/Geschäftsanteile/Aktien (Autor/Partner, Ehepartner, Kinder) an Firma: nein.

Erklärung zu nichtfinanziellen Interessen

Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Autorinnen/Autoren



Kai M. Förster

Dr. med. Jahrgang 1972, Facharzt für Kinder- und Jugendmedizin, Schwerpunkt Neonatologie. 2007–2018 Universitätskinderklinik am Dr. v. Haunerschen Kinderspital, Klinikum der LMU München. 2013–2018 Comprehensive Pneumology Center (CPC) der LMU, Deutsches Zentrum für Lungenforschung (DZL). 2017–2018 Physician Scientist am DZL. Seit 2018 Abteilung für Kinder- und Jugendmedizin am Krankenhaus Agatharied. Forschungsschwerpunkte: Bronchopulmonale Dysplasie (Studie: Attention to Infants at Respiratory Risks [AIRR]), neonatale ECMO, Simulationstraining in der Neonatologie.



Franziska Sattler

Dr. med., Jahrgang 1984. 2003–2010 Studium der Humanmedizin an der LMU/TU München. 2012 Promotion. 2011–2017 Facharzt Ausbildung Pädiatrie. 2017 Fachärztin für Kinder- und Jugendmedizin. Aktuell in der Weiterbildung Kinderpneumologie am Dr. von Haunerschen Kinderspital LMU München.



Andreas W. Flemmer

Prof. Dr. med. Prof. h.c., Jahrgang 1964, Facharzt für Kinder- und Jugendmedizin, Zusatzbezeichnung Neonatologie. Seit 2015 Leiter der Neonatologie der Universitätskinderklinik am Perinatalzentrum, seit 2016 Professur für Neonatologie an der LMU München.

Forschungsschwerpunkt: pulmonale Erkrankungen in der Neugeborenenperiode.

Korrespondenzadresse

Dr. med. Kai Martin Förster
Dr. von Haunersches Kinderspital
Neonatologie der Kinderklinik am Perinatalzentrum der LMU München
Campus Großhadern
Marchioninistraße 15
81377 München
E-Mail: kai.foerster@med.uni-muenchen.de

Wissenschaftlich verantwortlich gemäß Zertifizierungsbestimmungen

Wissenschaftlich verantwortlich gemäß Zertifizierungsbestimmungen für diesen Beitrag ist Dr. med. Kai Martin Förster, München.

Literatur

- [1] Robin B, Kim YJ, Huth J et al. Pulmonary function in bronchopulmonary dysplasia. *Pediatr Pulmonol* 2004; 37: 236–242
- [2] Shepherd EG, Clouse BJ, Hasenstab KA et al. Infant Pulmonary Function Testing and Phenotypes in Severe Bronchopulmonary Dysplasia. *Pediatrics* 2018; 141: doi:10.1542/peds.2017-3350
- [3] Frey U, Stocks J, Coates A. European Respiratory Society/American Thoracic Society. et al. Specifications for equipment used for infant pulmonary function testing. ERS/ATS Task Force on Standards for Infant Respiratory Function Testing. *Eur Respir J* 2000; 16: 731–740
- [4] Frey U, Stocks J, Sly P. European Respiratory Society/American Thoracic Society. et al. Specification for signal processing and data handling used for infant pulmonary function testing. ERS/ATS Task Force on Standards for Infant Respiratory Function Testing. *Eur Respir J* 2000; 16: 1016–1022
- [5] Ljungberg H, Gustafsson PM. Infant lung function testing: available and useful methods. *Breathe* 2004; 1: 13–23
- [6] Finnemore A, Toulmin H, Merchant N et al. Chloral hydrate sedation for magnetic resonance imaging in newborn infants. *Paediatr Anaesth* 2014; 24
- [7] Gappa M, Colin AA, Goetz I et al. Passive respiratory mechanics: the occlusion techniques. *Eur Respir J* 2001; 17: 141–148
- [8] Stocks J, Godfrey S, Beardsmore C. European Respiratory Society/American Thoracic Society. et al. Plethysmographic measurements of lung volume and airway resistance. ERS/ATS Task Force on Standards for Infant Respiratory Function Testing. *Eur Respir J* 2001; 17: 302–312
- [9] Bentsen MH, Markestad T, Oymar K et al. Lung function at term in extremely preterm-born infants: a regional prospective cohort study. *BMJ Open* 2017; 7: e016868
- [10] Baldwin DN, Pillow JJ, Stocks J et al. Lung-function tests in neonates and infants with chronic lung disease: tidal breathing and respiratory control. *Pediatr Pulmonol* 2006; 41: 391–419
- [11] Hulskamp G, Hoo AF, Ljungberg H et al. Progressive decline in plethysmographic lung volumes in infants: physiology or

- technology? *Am J Respir Crit Care Med* 2003; 168: 1003–1009
- [12] Jones M, Castile R, Davis S et al. Forced expiratory flows and volumes in infants. Normative data and lung growth. *Am J Respir Crit Care Med* 2000; 161: 353–359
- [13] Hulskamp G, Pillow JJ, Dinger J et al. Lung function tests in neonates and infants with chronic lung disease of infancy: functional residual capacity. *Pediatr Pulmonol* 2006; 41: 1–22
- [14] Schmalisch G, Wilitzki S, Roehr CC et al. Development of lung function in very low birth weight infants with or without bronchopulmonary dysplasia: longitudinal assessment during the first 15 months of corrected age. *BMC Pediatr* 2012; 12: 37
- [15] Nguyen TT, Thia LP, Hoo AF et al. Evolution of lung function during the first year of life in newborn screened cystic fibrosis infants. *Thorax* 2014; 69: 910–917
- [16] Danzer E, Hedrick HL, Rintoul NE et al. Assessment of early pulmonary function abnormalities in giant omphalocele survivors. *J Pediatr Surg* 2012; 47: 1811–1820
- [17] Agha H, El Heinady F, El Falaky M et al. Pulmonary functions before and after pediatric cardiac surgery. *Pediatr Cardiol* 2014; 35: 542–549
- [18] Fuchs SI, Gappa M. Lung clearance index: clinical and research applications in children. *Paediatr Respir Rev* 2011; 12: 264–270

Bibliografie

DOI <https://doi.org/10.1055/a-0828-1203>
Neonatalogie Scan 2019; 08: 289–303
© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 2194-5462

Punkte sammeln auf CME.thieme.de



Diese Fortbildungseinheit ist in der Regel 12 Monate online für die Teilnahme verfügbar. Den genauen Einsendeschluss finden Sie unter <https://cme.thieme.de/CXCGQPW>. Sollten Sie Fragen zur Online-Teilnahme haben, finden Sie unter <https://cme.thieme.de/hilfe> eine ausführliche Anleitung. Wir wünschen viel Erfolg beim Beantworten der Fragen!

Unter <https://eref.thieme.de/CXCGQPW> oder über den QR-Code kommen Sie direkt zur Startseite des Wissenstests.

VNR 2760512019156640326



Frage 1

Eine der folgenden Aussagen zu Lungenfunktionsmessungen im Säuglingsalter ist *falsch*. Welche?

- A Säuglinge können in jedem Fall ohne Sedierung untersucht werden.
- B Sie werden im Spontanschlaf in Rückenlage durchgeführt.
- C Lungenfunktionsmessungen im Neonatalalter werden nicht regelmäßig in der klinischen Routine eingesetzt.
- D Während der Lungenfunktionsmessung muss der Säugling mittels eines Herz-Atem-Monitors überwacht werden.
- E Infekte haben einen bedeutenden Einfluss auf die Lungenfunktionsmessung.

Frage 2

Für Lungenfunktionsmessungen im Säuglingsalter gilt welche Aussage?

- A Der Shutter zum kurzzeitigen Verschluss der Atemwege kann die Lungenfunktionsmessung nicht beeinflussen.
- B Chloralhydrat zur Sedierung sollte oral verabreicht werden.
- C Eine Lungenfunktionsmessung dauert ca. 1 Stunde.
- D Die Abfolge der durchzuführenden Tests oder deren Kombinationen sollte sich nicht nach dem klinischen Zustand des Säuglings richten.
- E Der Hering-Breuer-Reflex ermöglicht die passive Messung der mechanischen Eigenschaften der Lunge.

Frage 3

Welche Aussage zum Einfluss der Pathophysiologie des Neugeborenen auf die Lungenfunktionsmessung trifft *nicht* zu?

- A Apnoen beeinflussen die Interpretation.
- B Die Reihenfolge der Tests sollte auch durch die Untersuchungsindikation aufgrund der zugrundeliegenden Pathophysiologie festgelegt werden.
- C Die Dauer der ruhigen Schlafphasen verhält sich proportional zum postmenstruellen Alter.
- D Die Instabilität der Thoraxwand beeinflusst die funktionelle Residualkapazität (FRC).
- E Der Hering-Breuer-Reflex wird vagal vermittelt.

Frage 4

Eine der Aussagen zur Ruheatemanalyse ist *falsch*. Welche?

- A Eine Leckage hat einen großen Einfluss auf die Messung.
- B Eine Leckage kann an der Drift des Volumensignals gesehen werden.
- C Eine Leckage kann am Nicht-Zurückkehren eines stabilen endexpiratorischen Volumenstatus zum Ausgangsvolumen nach einem kurzen Atemwegsverschluss detektiert werden.
- D Messungen der Ruheatmung sollten im Anschluss an Tests mit forcierten Expirationsmanövern oder denen der passiven Mechanik durchgeführt werden.
- E Mit der Ruheatemanalyse lässt sich die Atemfrequenz bestimmen.

Frage 5

Welcher der folgenden Parameter wird bei der Säuglingslungenfunktionsmessung *nicht* erhoben?

- A Expirationszeit
- B Tidalvolumen
- C totale Lungenkapazität
- D Compliance
- E funktionelle Residualkapazität

Frage 6

Welche Aussage zur Ruheatemanalyse ist *falsch*?

- A Mit der Ruheatemanalyse lässt sich die Inspirationszeit nicht bestimmen.
- B Bei der Ruheatemanalyse wird der Atemgasfluss gemessen.
- C Bei der Ruheatemanalyse können mit dem Pneumotachografen die Volumina als Zeitintegrale berechnet werden.
- D Aufgrund der ausgeprägten Variabilität der Fluss-Volumenkurven bei der Ruheatemanalyse im frühen Kindesalter sollte die Interpretation nur in Zusammenschau mit dem klinischen Bild erfolgen.
- E Eine Abflachung des Expirationsteils der Fluss-Volumenkurve bei der Ruheatemanalyse deutet auf eine periphere Atemwegobstruktion hin.

Frage 7

Bei der Messung der Lungenmechanik gilt welche der folgenden Aussagen *nicht*?

- A Für die Beurteilung der Atemmechanik werden Änderungen von Druck und Atemgasfluss aufgezeichnet.
- B Die Compliance wird als die Änderung von Druckeinheit (Δp) pro Änderung der Volumeneinheit (ΔV) berechnet.
- C Die Resistance, d. h. der Atemwegswiderstand, wird als Quotient aus der Druckänderung (Δp) und dem daraus resultierenden Atemgasfluss ($\Delta V'$) berechnet.
- D Der Atemgasfluss und das Atemvolumen werden in der Regel mit einem Strömungssensor, dem Pneumotachografen (PNT) an der Atemwegsöffnung gemessen.
- E Messungen der passiven Atemmechanik (Compliance, Widerstand und Zeitkonstante) sind möglich, wenn ein Zustand der Relaxation in den Atemwegen herbeigeführt werden kann.

Frage 8

Welche Aussage zur Messung der Lungenmechanik ist *richtig*?

- A Bei der Single-Occlusion-Technik können Resistance, Compliance und die Zeitkonstante der Atemwege nicht aus einem einzigen Atemwegsverschluss berechnet werden.
- B Eine gültige Messung hängt nicht davon ab, ob es zu einer vollständigen Entspannung der Atemwege sowohl während des Verschlusses als auch während des anschließenden Ausatmens kommt.
- C Die Ergebnisse aus der Single-Occlusion-Technik spiegeln die kombinierte Mechanik der gesamten Atemwege wider.
- D Die automatisierte Messung der Lungenmechanik mittels „Inspiratory Capacity at Inflation Hold“ kann auch ohne Blick auf die klinische Situation des Kindes und die davon abhängigen Beatmungsparameter durchgeführt werden.
- E Ursache für ein verringertes Atemwegskaliber in der Säuglingszeit kann keine Sekretobstruktion sein.

Frage 9

Wodurch ist die Lungenfunktionsmessung im Säuglingsalter gekennzeichnet?

- A Die funktionelle Residualkapazität (FRC) kann auch mithilfe der Gasverdünnungstechnik bestimmt werden.
- B Eine angeborene Lungenfehlbildung stellt keine klinische Fragestellung dar, bei der eine Lungenfunktionsmessung beim Säugling eine zusätzliche Komponente in der Diagnostik bedeutet.
- C Die plethysmografische Beurteilung der FRC basiert auf dem Gesetz von Hagen-Poiseuille.
- D Die Bodyplethysmografie erfasst ausschließlich spirometrisch messbare Lungenvolumina.
- E Ursache für ein vergrößertes Atemwegskaliber kann ein erhöhter Tonus glatter Muskelzellen innerhalb der Bronchien sein.

Frage 10

Eine der folgenden Aussagen zur Lungenfunktion im Säuglingsalter ist *falsch*. Welche?

- A Ventilationsinhomogenitäten und insbesondere Veränderungen an den kleinen Atemwegen können mit den Auswaschverfahren sensitiv erfasst werden.
- B Die „Multiple-Breath-Washout-Methode“ (MBW) ist als Lungenfunktionsmessung in der Neonatologie geeignet.
- C Die „Single-Breath-Washout-Methode“ (SBW) erfordert eine gute Kooperation des Patienten.
- D Stickstoff ist sehr gut zur Messung der Lungenfunktion mittels Auswaschverfahren bei allen Säuglingen geeignet.
- E Messungen der Ruheatmung und deren Interpretation sind sehr komplex.